

> convection ascendants et descendants à travers les ouvertures.

Il est cependant beaucoup plus difficile d'estimer les débits correspondants. En égalant la force ascensionnelle qui s'exerce sur l'air chaud et le frottement aérodynamique avec l'air ambiant, on calcule des vitesses de l'ordre de 0,5 mètre par seconde pour des écarts de température de 10 °C. En supposant que la moitié de la surface des fenêtres, disons 4 mètres carrés pour notre salon de 20 mètres carrés, permet de faire rentrer de l'air de l'extérieur tandis que l'autre moitié sert à évacuer l'air vicié, on renouvelerait totalement les 50 mètres cubes d'air du salon en 50 secondes grâce à un débit phénoménal de 3600 mètres cubes par heure.

Cette estimation de débit est un peu trop élevée, et ce temps trop court, mais ces chiffres suggèrent ce que chacun a pu vérifier, à savoir que la convection naturelle parvient à renouveler l'air d'une pièce en quelques minutes. Cette durée est d'ailleurs suffisamment brève pour éviter, l'hiver, de refroidir les meubles et les murs; le confort thermique n'est par conséquent que momentanément perturbé! Mais tout cela suppose que la convection soit possible: sans vent et sans grand écart de température, il faut se résigner, à la mi-saison, à laisser les fenêtres ouvertes en permanence pour aérer.

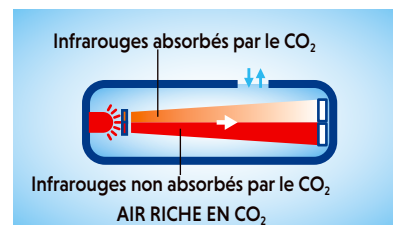
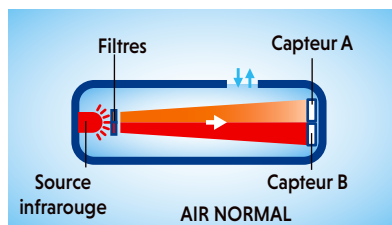
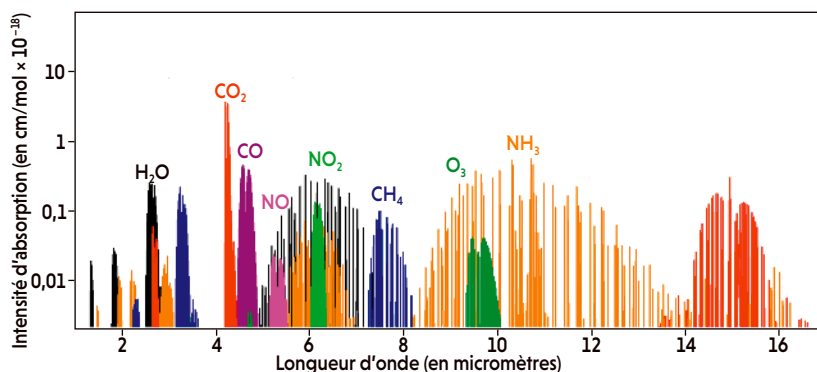
MESURER LA TENUEUR EN CO₂

Comment s'assurer que le renouvellement de l'air est suffisant? Dans l'industrie du bâtiment, un contrôle standard consiste à mesurer le taux de CO₂ de l'air intérieur. S'il existe des appareils à usage professionnel, on trouve désormais dans le commerce des détecteurs peu coûteux que l'on peut piloter avec une carte Arduino. Ces appareils, qualifiés de NDIR (pour *non dispersive infrared spectroscopy*, «spectroscopie infrarouge non dispersive»), mesurent l'absorption de la lumière infrarouge par les molécules de l'air.

En effet, le gaz carbonique absorbe les infrarouges autour d'une longueur d'onde de 4,3 micromètres, qui excite des modes de vibration de ses liaisons carbone-oxygène. Cette valeur est éloignée des bandes spectrales d'absorption des autres molécules de l'air, telles que le dioxygène (O₂), le monoxyde de carbone (CO) et l'eau: la mesure de l'absorption est donc très sélective (voir l'encadré ci-dessus). À 400 ppm de CO₂, l'intensité

DÉTECTER LE CO₂ AVEC DES INFRAROUGES

Le dioxyde de carbone présente un pic d'absorption du rayonnement à 4,3 micromètres de longueur d'onde, dans l'infrarouge. Ce pic d'absorption est bien séparé de ceux des autres gaz présents dans l'atmosphère (voir le graphique) et offre donc un moyen commode de détecter le CO₂ et de mesurer sa concentration. Les détecteurs NDIR comportent ainsi deux capteurs, l'un, A, opérant à la longueur d'onde du pic d'absorption, l'autre, B, opérant à d'autres longueurs d'onde, non absorbées (voir le schéma). Ainsi, le signal du capteur A dépend de la concentration en CO₂ de l'air traversé par le faisceau infrarouge, tandis que le capteur B produit un signal indépendant de cette concentration. Grâce à cette détection différentielle, les appareils NDIR mesurent la concentration de CO₂. Contrairement à d'autres types de détecteurs de CO₂, ils ne nécessitent pas de recalibrage régulier et restent opérationnels pendant plusieurs années.



d'un rayonnement vers 4 micromètres de longueur d'onde diminue de 2 % au bout de 5 centimètres. Cela semble peu, mais il faut s'en contenter si l'on veut un dispositif de mesure de petite taille.

C'est pourquoi les bons détecteurs NDIR effectuent des mesures différentielles. Ils comportent une source émettant dans l'infrarouge et deux capteurs, l'un sensible aux longueurs d'onde non absorbées par le CO₂ et qui sert de référence, l'autre sensible autour de la longueur d'onde de 4,3 micromètres, absorbée par le CO₂. L'intensité reçue par le second capteur varie donc avec la concentration de CO₂, contrairement à celle reçue par le premier, et la différence permet de déterminer la concentration de CO₂. Ainsi, avec un tel appareil que l'on trouve pour quelques dizaines d'euros, chacun peut vérifier si l'air qu'il respire est suffisamment renouvelé. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. K. Bhagat et al., **Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19**, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 903, F1, 2020.

U. Satish et al., **Is CO₂ an indoor pollutant ? [...]**, *Environ. Health Perspect.*, vol. 120(12), pp. 1671-1677, 2012.

J. Hodgkinson et R. P. Tatam, **Optical gas sensing : A review**, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 24(1), 012004, 2012.

P. F. Linden, **The fluid mechanics of natural ventilation**, *Annu. Rev. of Fluid Mech.*, vol. 31, pp. 201-238, 1999.

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

- 7 dossiers rédigés par des chercheurs et des experts sur le sujet
- Une lecture adaptée sur écrans

3,99 €



Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Thema* découvrez aussi



**Commandez et téléchargez
les numéros en pdf**



Pour lire votre numéro, rendez-vous dans votre compte client



boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne Université,
à Paris

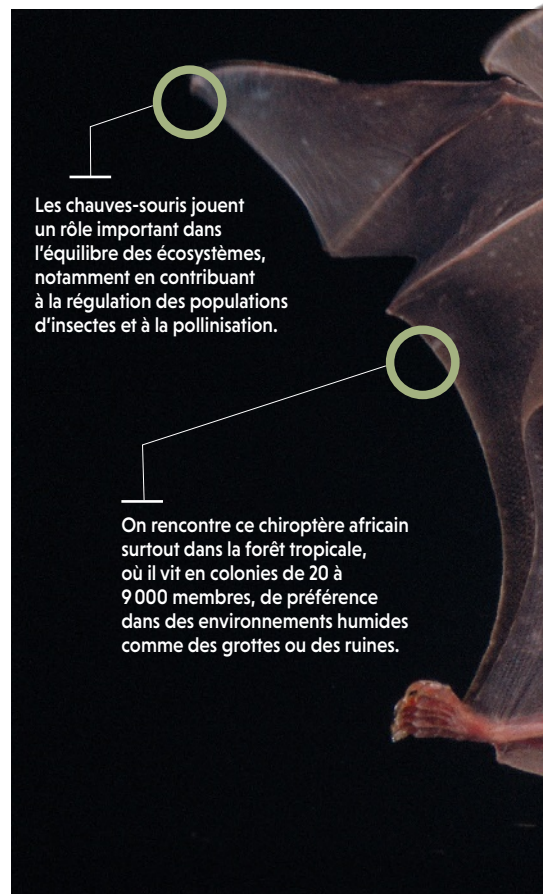
DES CHAUVES-SOURIS ET DES VIRUS

Les chiroptères véhiculent des virus létaux pour nombre de mammifères sans pour autant en souffrir. Leur secret? Un étonnant système immunitaire...

Rassemblées dans l'ordre des chiroptères, les chauves-souris sont les seuls mammifères au vol battu. Mais ces animaux nocturnes n'ont pas l'aura des oiseaux, qui séduisent par leurs ramages et leurs plumages. Ils ont même une réputation particulièrement mauvaise depuis le début de l'épidémie de Covid-19. En effet, il apparaît qu'ils ont joué un rôle clé dans l'émergence du coronavirus SARS-CoV-2, responsable de l'épidémie. Or ce virus s'ajoute à une longue liste d'agents hautement pathogènes dont les chauves-souris sont aussi des réservoirs. Comment les chiroptères sont-ils devenus de tels «viviers»? Aujourd'hui, grâce notamment à l'étude du génome de plusieurs espèces, on commence à y voir plus clair: leur trajectoire évolutive les a dotés d'un système immunitaire hors norme, d'une tolérance étonnante envers les virus.

En 2002, Daniel Haydon, de l'université d'Édimbourg, en Écosse, a redéfini le concept de réservoir en montrant que ce

dernier doit se référer à une population cible. Il se compose ainsi de populations animales où l'agent pathogène se maintient de manière permanente et à partir desquelles l'infection se transmet à la population cible – les humains pour le médecin (on parle de zoonose), les animaux d'élevage pour le vétérinaire. À la différence de l'espèce cible, l'espèce réservoir n'est pas rendue malade par l'agent pathogène. Les chauves-souris semblent néanmoins sortir de l'ordinaire, car elles véhiculent de nombreux virus létaux pour de nombreux mammifères cibles. Ainsi, le grand rhinolophe (*Rhinolophus discolor*) est réservoir du SARS-CoV-1, le coronavirus responsable de l'épidémie du Sras (syndrome respiratoire aigu sévère) qui a sévi en Chine puis dans d'autres pays en 2003-2004, et la roussette d'Égypte (*Rousettus aegyptiacus*) porte le virus de Marburg, proche du virus Ebola, source d'une épidémie en 2000 en République démocratique du Congo, puis d'une autre en 2005 en Angola.



Les chauves-souris jouent un rôle important dans l'équilibre des écosystèmes, notamment en contribuant à la régulation des populations d'insectes et à la pollinisation.

On rencontre ce chiroptère africain surtout dans la forêt tropicale, où il vit en colonies de 20 à 9 000 membres, de préférence dans des environnements humides comme des grottes ou des ruines.



Hervé Le Guyader
a récemment publié:
**Biodiversité, le pari
de l'espoir,**
(Le Pommier, 2020).

EN CHIFFRES

34

Le taux métabolique des chauves-souris en vol (la quantité d'énergie qu'elles consomment) est 34 fois supérieur à celui au repos. Leur température dépasse alors parfois 41 °C.

1/4

Sur les 5 100 espèces de mammifères placentaires (c'est-à-dire sans les marsupiaux et les monotrèmes), un peu moins de la moitié (2 250, soit 44 %) sont des rongeurs et un peu plus d'un quart (1 400, soit 27 %) sont des chauves-souris. Les mammifères les plus connus (ruminants, carnivores, cétacés...) n'en constituent donc qu'un peu plus d'un quart (1 450, soit 29 %).

35

C'est le nombre de familles de gènes qui ont changé de taille chez les chiroptères par rapport aux autres mammifères.

Les phylogénies moléculaires répartissent à présent les chauves-souris en deux sous-ordres, les yangochiroptères, rassemblant 14 familles de microchiroptères, et les yinptérochiroptères, comprenant les mégachiroptères et 5 familles de microchiroptères.

Cette chauve-souris utilise à la fois la vue et l'écholocation pour s'orienter. Toutefois, son système d'écholocation, au moyen de claquements de langue, ressemble plus à celui des dauphins qu'à celui des yangochiroptères.

Traditionnellement, on séparait les chiroptères en deux groupes, les mégachiroptères, surtout frugivores et au museau allongé, comme cette roussette, et les microchiroptères, plus petits, en général insectivores, à la face aplatie aux yeux minuscules, aux oreilles démesurées et au nez compliqué émetteur d'ultrasons.

Une famille de gènes était particulièrement touchée: celle codant les interférons, des glycoprotéines de la famille des cytokinines dont la synthèse est en général activée en présence d'un brin d'ADN étranger et qui déclenchent une réaction inflammatoire. Chez la roussette, le nombre de gènes qui codent ces interférons est considérable: son génome compte par exemple 22 variants du gène codant l'interféron- ω , alors que l'humain n'en porte qu'un. Davantage de gènes, davantage d'interférons et donc une riposte plus efficace contre les virus? Pas exactement. Le panel d'interférons- ω de la roussette pourrait plutôt lui conférer une meilleure sensibilité et lui permettre d'ajuster plus finement sa réponse immunitaire quitte à laisser le virus latent.

UN SYSTÈME IMMUNITAIRE SINGULIER

De fait, c'est aussi ce que suggère l'autre approche, par infection de cellules en culture, qu'une équipe internationale autour de Cara Brooks, de l'université de Californie à Berkeley, a utilisée tout récemment. Les cellules étaient issues de deux espèces, la roussette d'Égypte et le renard volant noir (*Pteropus alecto*). Le renard volant est étrange, car contrairement à la roussette et aux autres mammifères, ses cellules synthétisent en permanence des interférons, ce qui devrait lui causer des inflammations extrêmement nocives. Cara Brooks et ses collègues ont infecté, avec divers virus rendus fluorescents, des ➤

Comment ces animaux survivent-ils à des infections dues à de tels virus? Pour le savoir, deux approches ont été suivies: l'étude de génomes complets et l'infection de cellules en culture. Il y a deux ans, une équipe américaine conduite par Thomas Kepler, de l'université de Boston, et Gustavo Palacios, de l'Institut de recherche médicale de l'armée des États-Unis sur les maladies infectieuses, à Frederick, dans le Maryland, a comparé le génome de la roussette d'Égypte à ceux de 14 autres mammifères, dont l'humain. Elle a ainsi remarqué, chez le chiroptère, des originalités concernant des familles de gènes liés au système immunitaire inné.



Roussette d'Égypte
(*Rousettus aegyptiacus*)
Taille: entre 12 et 19 cm
Envergure des ailes: environ 60 cm
Durée de vie: environ 10 ans

> cultures cellulaires issues de ces deux espèces de chauves-souris. Ils ont constaté chez chacune de fortes réponses antivirales, mais aussi une diffusion étonnamment rapide des virus de cellule en cellule. Non seulement les cellules semblaient tolérer ces agents pathogènes, mais ces derniers s'y multipliaient particulièrement vite, et donc y mutaient plus vite que d'ordinaire. En d'autres termes, les réponses antivirales ne détruisaient pas les virus, et ces derniers prospéraient dans les cultures.

Les chauves-souris ne contrôlent donc pas leur charge virale. Mais pourquoi ne sont-elles pas malades ? Pour y voir plus clair, une équipe internationale autour de David Jebb, de l'institut Max-Planck de Dresde, en Allemagne, s'est penchée sur six génomes d'animaux distribués dans les deux sous-ordres des chiroptères : le grand rhinolophe, la roussette d'Égypte, le phyllostome coloré (*Phyllostomus discolor*), le grand murin (*Myotis myotis*), la pipistrelle de Kuhl (*Pipistrellus kuhlii*) et le molosse commun (*Molossus molossus*).

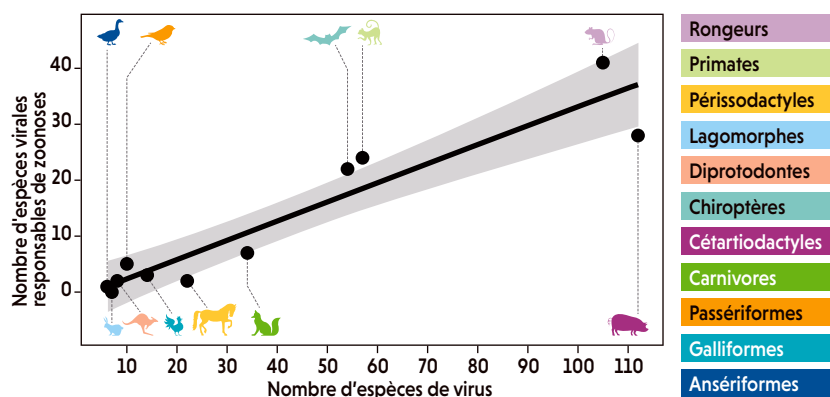
Les chercheurs ont repéré une dizaine de gènes pour lesquels des variants étaient fortement sélectionnés chez ces animaux. Ces gènes sont impliqués dans l'intégrité de la barrière intestinale, l'activation des macrophages, la régulation du système immunitaire... Autant d'éléments susceptibles de moduler la réponse antivirale. Or, comme vient de le préciser l'équipe de Lin-Fa Wang, de l'université Duke à Singapour, les mutations sélectionnées sont telles que les animaux présentent à la fois des réponses inflammatoires limitées et une tolérance exceptionnelle aux agents pathogènes, éloignant le risque d'emballement immunitaire. Et cela est d'autant plus vrai qu'une dizaine de gènes, présents chez les autres mammifères, avec des fonctions stimulatrices déclenchant l'inflammation, sont perdus chez les chauves-souris.

DES GÈNES PERDUS EN VOL ?

Il y a quatre ans, Lin-Fa Wang a avancé une déroutante explication à l'originalité évolutive d'un tel système immunitaire. L'adaptation au vol en serait la cause... Tout est parti d'une étude partielle d'une dizaine de génomes. Lin-Fa Wang et son équipe constatent que la famille des gènes à motif PYHIN, retrouvée chez tous les mammifères, est absente chez les chauves-souris. Ces pertes ont eu lieu à plusieurs reprises, indépendamment, dans les deux sous-ordres. Les produits de ces gènes sont des détecteurs d'ADN dans le cytoplasme, qu'il soit étranger ou non. Quand

DES ESPÈCES RÉSERVOIRS COMME LES AUTRES

On a longtemps pensé que les rongeurs et les chiroptères se comportaient comme des super-réservoirs. Mais récemment, Nardus Mollentze et Daniel Streicker, de l'université de Glasgow, en Écosse, ont battu cette idée en brèche en réalisant une étude statistique sur les espèces de mammifères et d'oiseaux réservoirs de 415 virus. D'une part, plus les groupes réservoirs abritent d'espèces de virus, plus on compte, parmi ces virus, d'espèces sources de zoonoses (voir la figure). D'autre part, dans chaque classe d'animaux (mammifères et oiseaux), plus un groupe réservoir compte d'espèces, plus il abrite d'espèces virales. Conclusion : si les groupes riches en espèces (chiroptères et rongeurs pour les mammifères, passériformes pour les oiseaux) abritent plus de virus à zoonose, chaque espèce réservoir de ces groupes n'en abrite pas plus que les autres.



ils en repèrent un, ils activent l'inflammation et la voie des interférons.

Or, en vol, les chauves-souris ont un métabolisme élevé qui produit des dérivés réactifs de l'oxygène, lesquels altèrent l'ADN. La perte des gènes à motif PYHIN serait alors une adaptation à un métabolisme élevé, car leur absence atténuerait fortement l'inflammation due à la présence, dans les cellules, des brins d'ADN dégradés à cause de ce métabolisme. Et ce mécanisme fonctionnerait de même pour l'ADN exogène, par exemple d'origine virale. Enfin, Lin-Fa Wang souligne qu'une telle perte de gènes amoindrit les inflammations chroniques dues à l'âge. Un tel contrôle de l'inflammation permettrait de supporter une haute charge virale sans que le système immunitaire ne s'emballe et d'allonger la durée de vie. On comprend pourquoi le milieu médical s'intéresse à ces animaux. Reste, cependant, à déterminer pourquoi nombre de virus qui colonisent les chauves-souris ne les affectent pas...

Ces originalités font-elles des chauves-souris des animaux dangereux ? Une étude exhaustive montre qu'elles ne contribuent pas plus que d'autres animaux à sang chaud (mammifères et oiseaux) aux zoonoses (voir l'encadré ci-dessus). Donc ne diabolisons pas les chauves-souris ! ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Gob et al., **Complementary regulation of caspase-1 and IL-1 β reveals additional mechanisms of dampened inflammation in bats**, *PNAS*, en ligne le 26 octobre 2020.

A. Banerjee et al., **Novel insights into immune systems of bats**, *Front. Immunol.*, vol. 11, article 26, 2020.

C. E. Brook et al., **Accelerated viral dynamics in bat cell lines, with implications for zoonotic emergence**, *eLife*, vol. 9, article e48401, 2020.

D. Jebb et al., **Six reference-quality genomes reveal evolution of bat adaptations**, *Nature*, vol. 583, pp. 578-584, 2020.

POUR LA SCIENCE HORS-SERIE

Édition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!



N° 108 (sept. 20)
réf. DO108



N° 107 (mai 20)
réf. DO107



N° 106 (févr. 20)
réf. DO106



N° 105 (nov. 19)
réf. DO105



N° 104 (juil. 19)
réf. DO104



N° 103 (avr. 19)
réf. DO103



N° 102 (févr. 19)
réf. DO102



N° 101 (nov. 18)
réf. DO101



N° 100 (août 18)
réf. DO100



N° 99 (mai 18)
réf. DO099



N° 98 (févr. 18)
réf. DO098



N° 97 (nov. 17)
réf. DO097

RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR [BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR/HORS-SERIE.HTML](https://boutique.pourlascience.fr/hors-serie.html)



À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science – Service marketing
170 bis Boulevard du Montparnasse – 75014 Paris – email : boutique@pourlascience.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science Hors-série, au tarif unitaire de 10,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ x 10,90 € = _____ €
2^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €
3^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €
4^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €
5^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €
6^e réf. _____ x 10,90 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Offre valable jusqu'au 31/12/20 en France Métropolitaine. Pour une livraison à l'étranger, merci de consulter boutique.pourlascience.fr

Les informations que nous collectons dans ce bon de commande nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z



PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR [BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR](https://boutique.pourlascience.fr)